公路桥梁桩基施工中复杂地质适应性处理技术研究

李启明

湖北交投建设集团有限公司 湖北 武汉 430070

【摘　要】：针对公路桥梁桩基在复杂地质条件下施工面临地层扰动、孔壁失稳、成孔风险突出等工程难题，本文以岩溶地质工程实践为依托，围绕复杂地质桩基适应性处理开展研究。通过多手段地质探测获取地层量化信息，匹配溶洞发育状态优选成孔工艺与持力层加固方案，落实施工工序动态管控、组合检测及现场应急处置措施。研究梳理出复杂地质桩基成套处置思路，相关工艺控制方法可为同类公路桥梁桩基工程的施工实施提供技术参考。

【关键词】：公路桥梁；桩基施工；复杂地质；适应性处理技术

DOI:10.12417/2811-0528.26.21.028

国内山区公路建设持续推进，不少桥梁桥址不可避免坐落于岩溶、破碎岩层等不良地质区段。复杂地质环境会加大桩基成孔作业难度，漏浆、塌孔、桩身成型缺陷等问题频发，直接制约工程施工安全与建设效率。现有施工技术多偏向单一工况处置，针对多变复杂地质的适应性施工方案仍有待进一步完善。结合实际工程案例，剖析复杂地质条件下桩基施工现实难点，构建相适配的处理技术体系并落实现场管控举措，对保障公路桥梁桩基施工质量，降低不良地质带来的工程风险具备现实工程意义。

1 公路桥梁桩基复杂地质施工难点剖析

1.1 地层扰动引发桩身成型缺陷

钻机切削、提钻排渣以及钻具往复升降作业会对孔周原状土体产生剪切与挤压作用，复杂地层中原生岩土结构遭到破坏后，孔壁剥落的土体碎屑容易混入灌注混凝土内部形成桩身夹泥缺陷。软硬交互地层钻进阶段，钻压参数未随地层转换同步调整会加剧土体扰动，孔壁泥皮完整性受损，混凝土灌注阶段外部土体持续向桩孔内部侵入，形成局部缩颈病害。该类隐蔽缺陷难以通过成孔阶段外观观测识别，会削弱桩身截面有效受力面积，降低桩基竖向承载能力，相关扰动机理分析可为钻进参数分层调控提供基础研究依据。

1.2 地下水影响孔壁稳定状态

孔隙潜水与岩溶裂隙水持续对孔壁岩土体产生渗透冲刷作用，地层内部渗流通道贯通后会带走孔壁颗粒物质，泥浆护壁形成的泥皮在动水持续侵蚀下出现剥落失效。孔内泥浆水头与外部地下水位压差控制失衡时，地下水沿裂隙向桩孔内部涌入，泥浆介质发生稀释，胶体率指标出现衰减。富水岩溶区段施工过程中，地下水位随降雨补给产生动态波动，静态泥浆护壁体系难以持续适配水位变化工况，该类水文作用下的孔壁失稳机理，能够为水头动态管控与泥浆配方优化提供工程参考。

1.3 不良地质增大成孔施工风险

岩溶溶洞、破碎节理岩层以及砂卵石夹层等不良地质体空间分布具备极强离散性，常规单孔地质勘察难以完整捕捉桩位局部地质信息[1]。钻进作业揭露溶洞、宽大裂隙时，泥浆会沿地下溶蚀通道快速流失，直接造成成孔作业中断；斜岩与半边岩区段钻头受力不均衡，极易产生偏锤、卡锤现象，成孔垂直度出现超限偏差。不同不良地质组合形式会衍生差异化施工风险，梳理各类地质体对应的成孔失效模式，能够为复杂地质下桩基施工风险预判与工艺选型积累可借鉴的工程研究资料。

2 公路桥梁桩基复杂地质适应性技术构建

2.1 地质参数精准探测方法

采用钻探与孔内声波CT探测相结合的组合手段完成桩位区域地质参数采集，常规钻探获取地层岩性、岩层埋深、充填物质物理指标，孔内声波 CT 完成钻孔周边径向范围扫描，捕捉钻探点位之间隐蔽溶洞、节理裂隙的空间展布形态。探测数据导入三维地质模型完成坐标拟合，完成溶洞顶板厚度、裂隙延展范围、充填体塑性状态的量化标定。多源探测数据相互校验可以弥补单一钻探手段采样点有限带来的信息盲区，获取的量化地质指标可以直接作为后续成孔工艺选取、加固参数确定的输入条件，为复杂地质条件桩基技术方案定量化设计提供数据支撑。

2.2 桩基成孔工艺优化设计

依托已经获取的量化地质数据开展桩基成孔工艺优化设计，针对中小型充填溶洞工况采用冲击成孔搭配片石黏土回填处置，控制土石配比维持在 1∶3 至 1∶5 区间，采用小冲程反复冲击挤压实现孔壁自主造壁。面对高度较大的空洞型溶洞，核算护筒受力条件确定钢板厚度参数，分节加工钢护筒构件，冲锤预扩孔后借助振动锤完成护筒沉放作业，护筒底部嵌入下层完整岩层不少于 0.5m。按照溶洞规模、充填类别划分工况

匹配对应成孔工序，工艺参数与地质条件形成对应关系，可为同类项目成孔方案编制提供参数参照依据。见图 1。

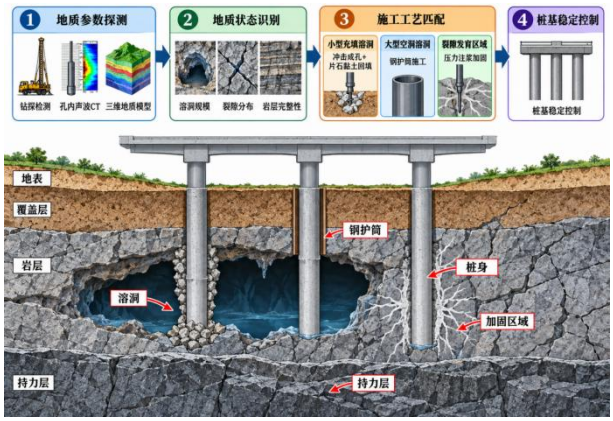


图 1 复杂地质桩基适应性处理技术流程图

2.3 桩底持力层加固技术选型

结合桩底位置岩体完整程度、溶洞发育规模开展持力层加固技术选型。桩底下方分布小型裂隙孔洞时采用压力注浆工艺，预埋注浆管布设至桩底目标区域，通过分级稳压方式向空隙内压注水泥浆液，浆液逐步渗透充填裂隙内部松散碎屑，待浆液固化后将破碎岩体胶结成整体，提升持力层岩体的完整性与承载力。桩底存在高落差贯通溶洞且不具备钢护筒穿透施工条件时，调整桩基受力模式，将原本依靠岩层承载的端承受力形式转换为摩擦受力形式，适度增加桩身根数分摊上部结构传递的荷载[2]。各类加固手段对应差异化的地质边界条件，厘清不同技术方案适用的地质阈值，能够为复杂地质环境下持力层处理方案的快速判定与技术选型提供可靠技术参考。

3 公路桥梁桩基复杂地质施工技术实施管控

3.1 现场施工工序动态管控

钻进、护筒沉放、回填处置以及混凝土灌注各作业环节同步采集现场监测数据，钻进过程严格把控冲程幅值，临近溶洞顶板位置把冲程控制在 1 m 以内，避免冲锤瞬间击穿顶板引发地层扰动[3]。钢护筒下放过程采集垂直度实时监测数据，分节拼接部位做好焊缝质量核验。结合现场揭露的实际地质情况对既定工序参数做实时修正，地质条件出现变化时暂停后续作业开展复核核验。全过程工序监测记录形成完整的施工技术台账，为同类复杂地质桩基项目的过程管控提供可复用的实操参照。

3.2 桩体质量检测方案落实

采用超声波透射检测搭配钻芯取样的组合方式完成桩体质量检测工作，待桩基混凝土达到规定强度之后依托预埋声测管开展超声波透射检测，采集桩身不同深度位置的声时、波幅参数，识别桩身内部夹泥、空洞等内部缺陷。超声波检测结果出现异常区段，布设钻芯孔实施钻芯取样，直观获取芯样完整状态，核验桩底持力层实际固结效果。两类检测手段实现桩身完整性与桩底地层状态的双重验证，检测流程能够为复杂地质桩基质量评定工作提供技术参考依据。

3.3 施工风险应急处置落实

依据复杂地质桩基施工常见失效模式预先配置对应的处置物料与机具，现场储备片石、黏土以及不同规格钢护筒构件，配备振动锤、补浆设备保障突发工况快速响应。成孔作业出现漏浆现象时即刻提升钻具，不间断向孔内补给泥浆维持孔内水头高度，利用储备填料实施孔内回填挤压作业。大溶洞诱发大规模塌孔的工况下完成钻具与护筒快速回撤，实施回填封堵后再重新开展成孔作业。各类处置流程形成标准化作业逻辑，为岩溶等不良地质条件下的现场风险处置积累实操借鉴资料。

4 结语

复杂地质条件下公路桥梁桩基施工受地层条件不确定性制约，各类成孔病害的产生往往是地质条件与施工工艺共同作用的结果。依托岩溶地区工程实践形成的地质探测、工艺适配、现场管控一体化处置思路，可实现不同不良地质工况下施工手段的合理选用。地层扰动、地下水作用带来的施工隐患，需要依靠前期精准探测与全过程动态管控共同化解。各类处置工艺的选用需要结合溶洞规模、充填状态综合判定，不能套用统一模式。相关技术实践经验，可为山区同类公路桥梁桩基项目开展施工技术决策提供工程借鉴。

参考文献：

[1] 何艳龙,赵付强,许晓轩.超厚砂层地质条件下旋挖钻孔灌注桩施工技术[J].施工技术(中英文),2025,54(7):102-105.

[2] 赵娟,许谷星.“旋挖+冲击”超大直径复杂地层接力成孔施工技术[J].西部探矿工程,2023,35(11):5-8.

[3] 付梦求.复杂岩溶地质桥梁桩基础的设计和施工探究[J].广东土木与建筑,2023,30(12):120-123.